doi：10.6046/zrzyyg.2023081
引用格式：曹德龙,唐廷元,林 震,等. 福建省生态系统健康程度耦合评估及其时空演化分析[J].自然资源遥感,202×,3×(×):×-×.（Cao D L,Tang T Y Lin Z, et al. Analysis of the coupled assessment of ecosystem health and its spatial and temporal evolution in Fujian Province [J]. Remote Sensing for Natural Resources,202×,3×(×):×-×.）

福建省生态系统健康程度耦合评估及其时空演化分析

曹德龙[1]，唐廷元[2]，林 震[1]，徐 政[2]，闫 旭[2]
（1 北京林业大学生态文明研究院，北京 100083；2 北京市测绘设计研究院，北京 100038）

摘要：为了探究近 15 a 福建省生态优良的成因，以 5 a 为时间间隔选取 2005—2020 年福建省 MODIS 影像和土地利用数据等为数据源，构建土地利用强度体系、采用遥感生态指数（remote sensing ecological index，RSEI）为分析方法，并利用耦合协调模型分析 RSEI 与土地利用强度的耦合关系，最后对福建省 2005—2020 年的生态健康进行时空演化分析。结果表明，①2005—2020 年间，福建省全省生态环境发展呈“改善-退化-退化”的趋势，RSEI 均值 2020 年为 0.704 8，生态环境等级均为良好；②福建省全省土地利用强度呈增长趋势，增长率为 26.00%，其中三明市土地利用强度增长最多，增长 160.91%；③福建省全省耦合协调度上升 0.75，达到良好协调；省内各市耦合协调度均为上升，除厦门市耦合协调度下降 0.131，耦合协调度为轻度失调。本研究填补了生态系统健康程度与土地利用强度互动研究机制的空白，也为福建省乃至全国的生态文明建设和生态系统健康程度评估研究提供了新的视角。

关键词：福建；土地利用强度；生态系统健康程度；耦合协调
中图法分类号：TP 79 **文献标志码**：A **文章编号**：2097-034X（202×）0×-0×××-××

0 引言

随着新型城镇化的不断深入，稳定健康的生态系统正在成为新型城镇化发展的基本要求[1]。如何应对经济发展中出现的复杂生态挑战，仍是值得关注的问题[2]。“社会-经济-环境”三者相互影响，其耦合关系强调三者在协同作用过程中所产生的协同效应。通过对三者的耦合关系进行分析评估，可以理解为城市的发展之路及其制约因素，并提供有力指导以实现可持续发展。

20世纪70年代以来，对生态系统健康程度评价的研究逐渐成为国内外学界研究的热点，与生态系统健康程度的相关研究逐渐增多，但大多数研究仅基于单一维度或特定维度对生态系统健康程度进行定性或者定量的评估，例如使用归一化差异植被指数（normalized difference vegetation index，NDVI）[3-6]、叶面积指数（leaf area index，LAI）[7-8]和净初级生产力（net primary productivity，NPP）[9]评估植被的生长；基于遥感影像热红外波段的地表温度探测城市热岛监测[10]；构建各种干旱指数以评估区域干旱状况[11-13]。由于生态系统的复杂性，单一指标往往无法对生态系统进行全面有效分析与评估[14]。遥感技术具有大范围监测、可周期性和实时性等优点，被广泛用于生态系统健康程度评价。目前基于遥感的生态指数中遥感生态指数

收稿日期：2023-03-28；修订日期：
基金项目：国家自然科学基金专项项目“基于新时期国家自然科学基金资助导向的资助体系优化研究”（编号：J192400016）、国家社科基金重点项目“习近平总书记科技创新思想与世界科技强国战略研究”（编号：17AKS004）和北京市社会科学基金重大项目“坚持和完善生态文明制度体系研究”（编号：20LLZZA015）共同资助。
第一作者：曹德龙（1988—），男，工程师，博士研究生，主要从事生态文明建设理论与应用、生态系统对区域环境变化研究。Email：dron_tsao@bjfu.edu.cn。
通信作者：林震（1972—），男，教授，博士生导师，主要从事生态文明建设理论与应用、生态系统对区域环境变化研究。Email：linzhen66@bjfu.edu.cn。

（remote sensing ecological index，RSEI）使用主成分分析方法耦合了NDVI、湿度指数（wetness index，WET）[15]、干度指数（normalized difference based built and impervious surface index，NDBSI）[16-17]和地表温度（land surface temperature，LST）[18]4个生态指标，可以对区域生态系统健康程度进行系统性评价[19]，已得到越来越多的专家学者实验证明[16-19]。人类世中世界最大的问题，就是人类如何应对“社会—经济—环境”三者的耦合，社会、经济以及环境已经成为一个密不可分的研究整体。量化区域生态环境与经济发展的关系，鲁钰等[20]利用生态压力指数、生态协调系数和生态足迹多样性指数等指标，采用STIRPAT（stochastic impacts by regression on population, affluence, and technology）扩展模型结合主成分回归模型分析三维生态足迹演变的主要驱动因素；熊曦[21]将欧洲环境局的DPSIR（即驱动力—压力—状态—影响—响应）环境管理模型引入到其生态文明建设分析评价，运用粗糙集理论和方法，就其生态文明建设展开分析评价；Gao等[22]构建土地利用强度指标体系和耦合协调度模型，探讨生态服务价值与土地利用强度的关系以及其变化原因。因此，为了更加全面地对福建省生态系统健康程度进行分析评估，就要探究社会、经济发展对生态环境的综合影响，本文将从社会与经济的维度构建福建省土地利用强度体系。

综上，以福建省为研究区，采用间隔为5 a的2005—2020年MODIS影像、土地利用数据以及福建省市各级统计年鉴、生态年鉴为数据源，通过MODIS影像计算RSEI指数，对福建省全域2005—2020年的生态健康状况进行时空分析评估；通过土地利用结构、土地投资和土地利用效率构建福建省土地利用强度体系，分析福建省社会、经济发展的15 a时空变化；利用RSEI和土地利用强度构建耦合协调模型，分析福建省市生态健康变化和经济社会发展的协调程度。本研究不仅评估福建省生态健康状况，而且为福建省生态环境保护、发展提供数据支撑。

1 研究区及其数据源

1.1 研究区概况

福建省 (E 115°50′~20°40′，N 23°33′~28°20′)位于我国的东南部沿海地区，与浙江省、江西省、广东省接壤（图1）。省辖福州市、厦门市、漳州市、泉州市、三明市、莆田市、南平市、龙岩市和宁德市等9个设区市，面积约为12.4万km²，常住人口4 161万人（截至2020年）[23]。福建省内地势复杂，中西部为河谷及盆地，东部沿海为丘陵及滨海平原，地势总体上西北高东南低[24]。

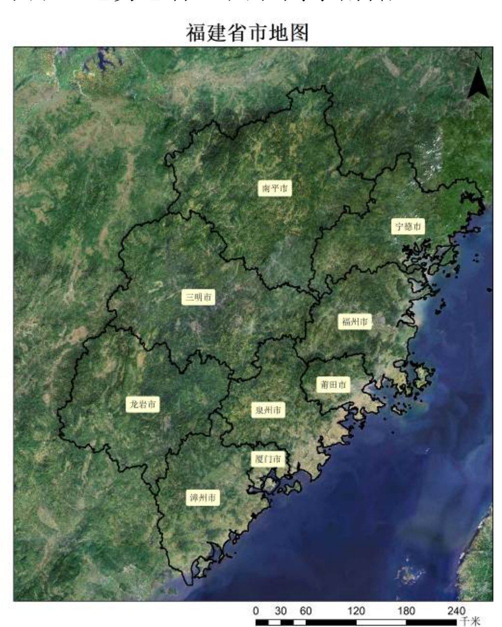


图 1 研究区概况图

Fig.1 Map of study area

根据福建省生态环境厅2001—2020年生态环境状况公布显示，福建省生态环境处于优良水平、生态环境状况指数持续保持全国前列。福建省作为全国最先开展生态建省的省份之一，自2000年起，福建把资源消耗、环境损害、生态效益纳入福建经济社会发展评价体系，但在生态治理实践的过程中，依然存在需要解决的问题[25-26]，故此，本文将福建省全省作为主要研究对象，分地市进行数据采集及分析，以期为福建省生态文明建设提供理论支撑和技术支持。

1.2　数据源

为了对福建省进行生态环境动态监测与分析，本文采用时间间隔为5 a的2005—2020年福建省MODIS影像、土地利用数据与经济数据等多种数据为数据源。

MODIS影像利用GEE（Google Earth Engine）[27]平台中4个时间（2005年、2010年、2015年、2020年）、空间分辨率为500 m、3种产品（MOD091，MOD11A2和MOD13A1）构成MODIS数据集，并通过GEE平台计算得到研究区2005年、2010年、2015年和2020年的RSEI空间分布结果。

福建省土地利用数据来自武汉大学[28]在GEE平台上制作1990—2020年中国土地覆盖数据集，包括耕地、林地、灌木、草地、水域、冰雪、建设用地、湿地等8种类型。为了充分计算研究区的生态系统服务价值，本文使用ArcGIS10.5软件对该土地覆盖数据集进行重新分类，并利用空间统计分析工具，在栅格尺度（500 m×500 m）上计算重新划分的土地面积，最终得到耕地、水域、草地、林地、建设用地5种不同的土地利用类型。其他社会经济数据来自福建省、设区市各级统计年鉴、生态年鉴及环境年报。

2　研究方法

为了研究福建省2005—2020年生态环境变化以及评价福建省近15 a的生态治理成效，首先利用GEE平台以MOIDS影像计算研究区2005年、2010年、2015年和2020年的RSEI空间分布结果，并进行时空分析；其次，通过构建土地利用强度指标体系，分析研究区的土地利用状况；最后，通过构建RSEI与土地利用强度的耦合协调模型，探讨二者之间的关系，其流程图如图2所示。

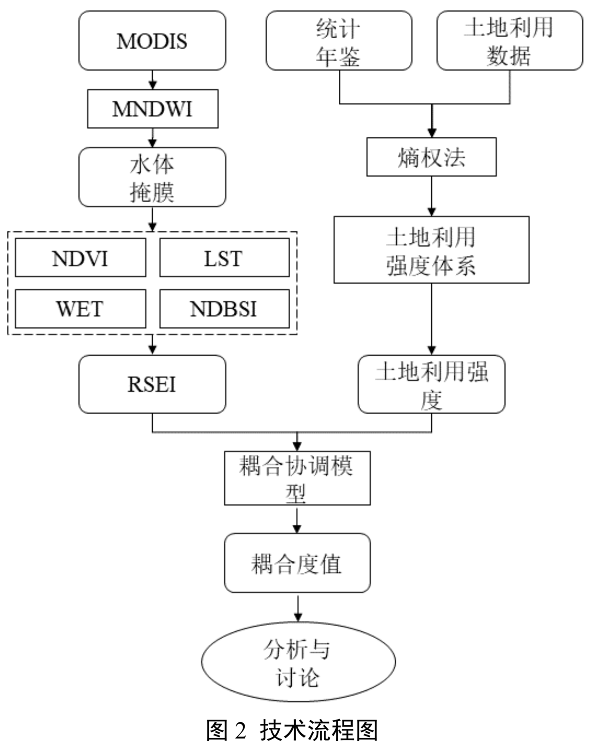


图2　技术流程图

Fig.2 Flow chart

2.1 RSEI 计算

为了进行大规模遥感环境监测，采用中低空间分辨率MODIS影像计算RSEI值。RSEI[29-30]指数是基于绿度、湿度、热度和干度指标建立的基于遥感信息和自然因素的指数。绿度指标采用NDVI、热度指标采用LST、湿度指标采用WET、干度指标采用NDBSI，LST数据采用MODIS产品，其余计算公式分别为：

$$NDVI=\left(NIR_1-Red\right)/\left(NIR_1+Red\right) \quad , \quad (1)$$

$$WET=0.1147*Red+0.2489*NIR_1+0.2408*Blue+0.3132*Green \\ -0.3122*NIR_2-0.6416*SWIR_1-0.5087*SWIR_2 \quad , \quad (2)$$

$$IBI=\frac{\frac{2*SWIR_1}{SWIR_1+NIR_1}-\left[\frac{NIR_1}{NIR_1+Red}+\frac{Green}{Green+SWIR_1}\right]}{\frac{2*SWIR_1}{SWIR_1+NIR_1}+\left[\frac{NIR_1}{NIR_1+Red}+\frac{Green}{Green+SWIR_1}\right]} \quad , \quad (3)$$

$$SI=\frac{[(SWIR_1+Red)-(NIR+Blue)]}{[(SWIR_1+Red)+(NIR+Blue)]} \quad , \quad (4)$$

$$\mathrm{NDBSI}=\frac{IBI+SI}{2} \quad , \quad (5)$$

式中：*Blue*，*Green*，*Red*，NIR_1, NIR_2, $SWIR_1$, $SWIR_2$分别为蓝光、绿光、红光、近红外1、近红外2、短波红外1、短波红外2波段反射率值；*IBI*为建筑指标；*SI*为土壤指标。

RSEI的计算，考虑研究区内有较多水体会影响RSEI计算，首先需采用改进的归一化差异水体指数（modified normalized difference water index，MNDWI）[31]提取水体阈值进行水体掩模；然后计算NDVI，LST，WET和NDBSI这4个指数并分别进行归一化处理，计算公式为：

$$NI_i=\left(I_i-I_{min}\right)/\left(I_{\max}-I_{min}\right) \quad , \quad (6)$$

式中：NI_i为各指标的归一化结果；I_i为各指标的单个值；$I_{\max}$和$I_{\min}$分别为各指标的最大值和最小值。

最后采用主成分分析法（principal component analysis，PCA）[32]对归一化后的指标进行分析，并采用第一主成分作为各指标权重进行加权计算获得最终的RSEI。

$$RSEI_0=1-PC_1*[f(NDVI,WET,LST,NDBSI)] \quad , \quad (7)$$

$$RSEI=(RSEI_0-RSEI_{0min})/(RSEI_{0max}-RSEI_{0min}) \quad , \quad (8)$$

式中：$RSEI_0$为生态指数的初始值；PC_1为主成分分析的第一个成分；$RSEI_{\min}$和$RSEI_{\max}$分别为RSEI的最小值和最大值。为了更好地利用RSEI指标反映福建省的生态健康状况以及进行空间分析，参考《生态评价技术规范》中的生态环境分级标准，将RSEI分为5个等级：最差[0，0.2)，差[0.2，0.4)，一般[0.4，0.6)，良好[0.6，0.8）和好[0.8，1.0]。

2.2 土地利用强度计算

为了分析评价福建省2005—2020年土地利用变化，参考前人研究[33]结果，构建福建省土地利用强度指标体系包括土地利用结构、土地投资和土地利用效率3个部分，具体指标体系见表1。土地利用结构包括耕地比率、林地比率、草地比率、建设用地比率4种指标，土地投资包括农作物播种面积、固定资产投资和就业人数3种指标，土地利用效率包括粮食产量、国内生产总值（gross domestic product，GDP）、工业总产值和农业总产值4种指标。为了构建基于福建省市的土地利用强度指标，先对11种指标进行标准化，再采

用熵权法确定各指标的权重，并计算土地利用强度，进行等级分类，分类体系如表1所示。

表 1 福建省市土地利用强度指标体系

Tab.1 Fujian municipal land use intensity indicator system

指标体系	指标	类型	福建省	福州市	厦门市	莆田市	三明市	泉州市	漳州市	南平市	龙岩市	宁德市
土地利用结构	耕地比率	正	0.001	0.065	0.153	0.228	0.120	0.192	0.106	0.125	0.146	0.106
	林地比率	正	0.000	0.092	0.068	0.098	0.093	0.096	0.074	0.099	0.087	0.074
	草地比率	正	0.012	0.079	0.082	0.080	0.080	0.070	0.103	0.095	0.077	0.103
	建设用地比率	正	0.007	0.077	0.074	0.072	0.081	0.075	0.089	0.093	0.083	0.089
土地投资	农作物播种面积	正	0.241	0.204	0.141	0.065	0.065	0.068	0.078	0.063	0.070	0.078
	固定资产投资	负	0.120	0.079	0.069	0.071	0.075	0.084	0.083	0.096	0.079	0.083
	就业人数	正	0.132	0.084	0.076	0.099	0.137	0.065	0.098	0.071	0.067	0.098
土地利用效率	粮食产量	负	0.100	0.063	0.065	0.070	0.107	0.086	0.095	0.111	0.124	0.095
	GDP	正	0.135	0.102	0.102	0.089	0.091	0.098	0.114	0.093	0.101	0.114
	工业总产值	正	0.123	0.070	0.072	0.062	0.067	0.071	0.074	0.070	0.069	0.074
	农业总产值	正	0.130	0.086	0.099	0.067	0.084	0.095	0.087	0.083	0.096	0.087

2.3 耦合协调度模型

耦合协调度模型[34]是对不同模块之间关联度的度量。模块之间的连接越多，耦合越强，独立性越低。最初主要用于软件系统，已被用于其他领域，如环境科学、经济学等。本文利用耦合协调度研究了福建省土地利用强度与生态系统服务价值的相关性。

为了更好地反映耦合协调关系，对研究区土地利用强度与生态环境质量之间的耦合协调度进行了分类，如表2所示。

表 2 耦合协调度阈值对照表

Tab.2 Comparison table of coupling coordination thresholds

耦合协调度 D 值区间	协调等级	耦合协调程度
[0.0，0.1)	1	极度失调
[0.1，0.2)	2	严重失调
[0.2，0.3)	3	中度失调
[0.3，0.4)	4	轻度失调
[0.4，0.5)	5	濒临失调
[0.5，0.6)	6	勉强协调
[0.6，0.7)	7	初级协调
[0.7，0.8)	8	中级协调
[0.8，0.9)	9	良好协调
[0.9，1.0]	10	优质协调

该模型的方程为：

$$D_t = \sqrt{C_t \cdot T_t}$$ ，（9）

$$C_t = 2 \cdot \sqrt{(Land_t \cdot RSEI_t) / (Land_t + RSEI_t)}$$ ，（10）

$$T_t = 0.5 \cdot Land_t + 0.5 \cdot RSEI_t \quad , \quad (11)$$

式中：$Land_t$为研究区域 t 年份的土地利用强度；$RSEI_t$为研究区 t 年份的 RSEI 值；C_t为研究区域 t 年份土地利用强度与 RSEI 的耦合度；T_t为研究区域 t 年份土地利用强度与 RSEI 协调发展水平的综合评价指数；D_t为表示研究区域 t 年份土地利用强度与 RSEI 的耦合协调度。本文假设土地利用和 RSEI 在研究区的综合发展中起着同等重要的作用，因此计算 T_t时系数均为 0.5。

3 结果与分析

3.1 基于 RSEI 福建省 2005—2020 年生态环境质量时空分析

以间隔5 a选取2005年、2010年、2015年和2020年的MODIS影像对福建省生态环境进行分析，根据RSEI计算模型以及生态环境质量分级得到RESI等级空间分布如图3所示。从2005—2020年，福建省全省整体生态环境发展呈“改善-退化-退化”的趋势，2020年各省市的RSEI均值都大于0.6（表3），生态环境等级均为良好。除福州市和宁德市的生态环境发展呈“改善-退化-改善”的趋势外，福建省内各市生态环境发展趋势与全省保持一致；省内各市RSEI均值都大于0.6，生态环境等级为良好，除厦门市RSEI均值在0.4~0.6之间，生态环境等级为一般外；其中福州市RSEI均值增长最多，增长9.14%，厦门市RSEI均值有所下降，下降为1.24%。2005—2010期间，福建省全省整体生态环境质量提升最明显，RSEI均值提升13.47%，生态环境等级均为良好；省内各市生态环境均有所提升，宁德市RSEI均值提升最大，增长19.07%。2010—2015年期间，福建省全省RSEI均值下降5.34%，生态环境等级均为良好；省内各市生态环境均有所退化，厦门市RSEI均值下降最多，降低10.61%。2015—2020年期间，福建省全省RSEI均值下降0.94%，生态环境等级均为良好；除福州市和宁德市的RSEI均值分别提升3.94%和5.68%外，省内各市RSEI均值均有所下降，尤其厦门市下降最为明显，降低5.64%。

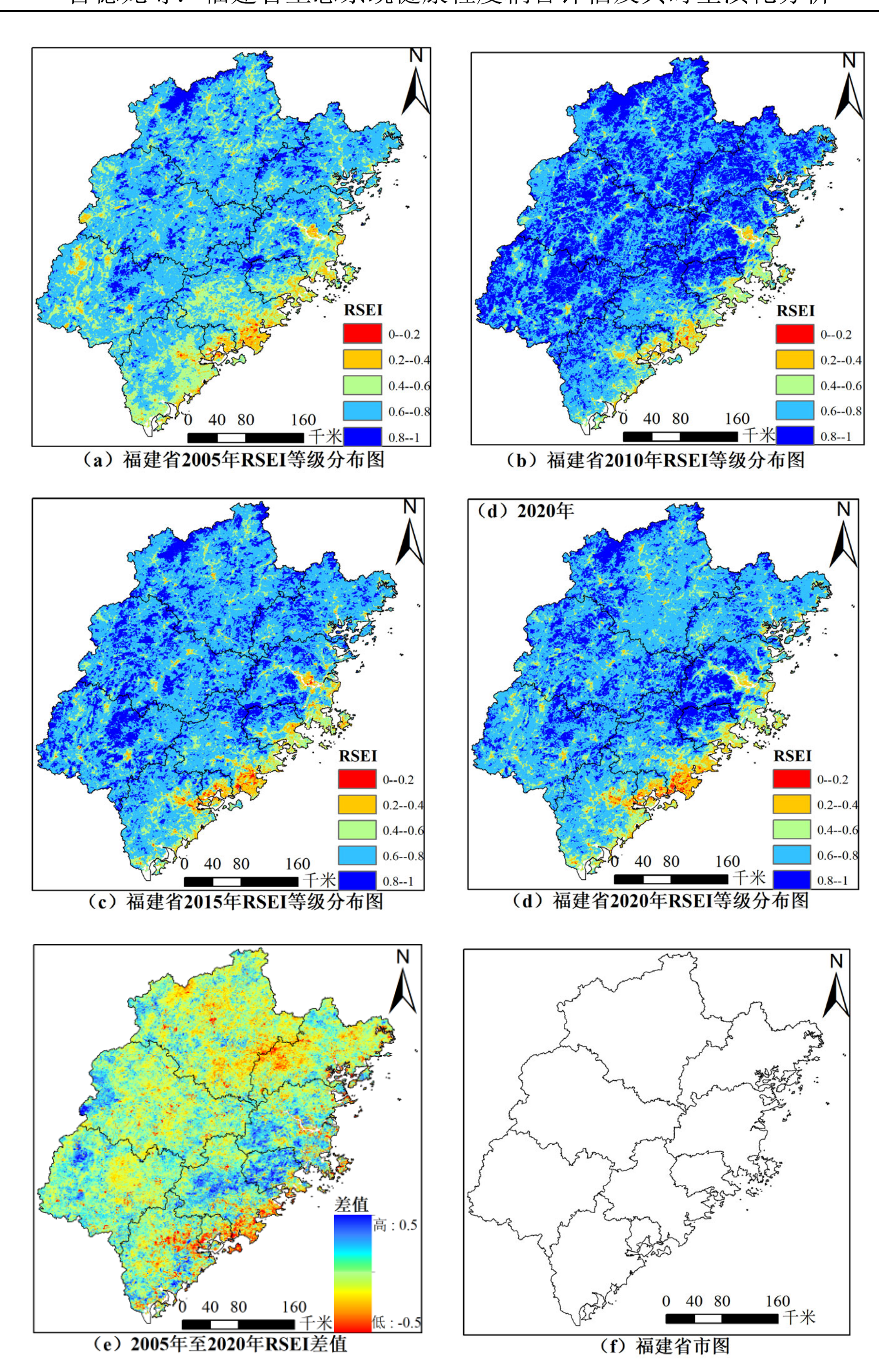


图 3　福建省 2005 年至 2020 年 RSEI 分布等级

Fig.3 RSEI distribution levels in Fujian province from 2005 to 2020

表 3 福建省市 2005 年至 2020 年 RSEI 平均值

Tab.3 Average table of RSEI from 2005 to 2020 in Fujian province and city

年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
福建省	0.662 4	0.751 6	0.711 5	0.704 8
福州市	0.643 4	0.719 1	0.675 6	0.702 2
厦门市	0.491 0	0.574 9	0.513 9	0.484 9
莆田市	0.695 1	0.776 5	0.731 8	0.710 9
三明市	0.696 9	0.773 7	0.745 0	0.744 6
泉州市	0.581 7	0.688 2	0.645 2	0.633 0

漳州市	0.590 1	0.698 2	0.650 7	0.630 2
南平市	0.705 0	0.782 7	0.740 5	0.732 0
龙岩市	0.669 8	0.777 4	0.741 7	0.725 2
宁德市	0.591 4	0.704 2	0.653 1	0.690 2

3.2 基于土地利用强度福建省 2005—2020 年时空分析

通过土地利用数据和其他社会经济数据，计算2005年、2010年、2015年和2020年的福建省土地利用强度值，分析其土地利用变化。从2005—2020年，福建省全省土地利用强度呈增长趋势，增长率为26.00%（表4）。除莆田市土地利用强度下降3.52%，福建省内各市土地利用强度均为增长；其中，三明市土地利用强度增长最多，增长160.91%，龙岩市土地利用强度增长101.82%。2005—2010年期间，福建省全省土地利用强度增长2.29%；省内福州市和莆田市的土地利用强度均为下降，下降率分别为13.71%和8.46%；三明市土地利用强度增长最多，增长率为63.32%。2010—2015年期间，福建省全省土地利用强度增长22.16%；省内三明市土地利用强度增长最多，增长率为52.27%；仅厦门市土地利用强度下降，下降16.07%。2015—2020年期间，福建省全省土地利用强度增长0.84%；仅莆田市土地利用强度下降6.33%，其余各市土地利用强度均为增长；龙岩市土地利用强度增长最多，增长率为28.71%。

表 4 福建省市 2005 年至 2020 年土地利用强度

Tab.4 Land use intensity table for Fujian province and cities from 2005 to 2020

年 省、市	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
福建省	0.428 4	0.438 2	0.535 3	0.539 8
福州市	0.480 8	0.414 9	0.473 9	0.533 1
厦门市	0.486 7	0.506 5	0.425 1	0.543 9
莆田市	0.463 4	0.424 2	0.477 3	0.447 1
三明市	0.256 3	0.418 6	0.637 4	0.668 7
泉州市	0.442 5	0.484 2	0.486 9	0.502 0
漳州市	0.381 6	0.466 1	0.551 1	0.630 4
南平市	0.368 3	0.521 0	0.561 4	0.624 9
龙岩市	0.335 4	0.509 6	0.525 9	0.676 9
宁德市	0.353 3	0.457 8	0.569 5	0.617 7

3.3 耦合协调度分析

利用耦合协调模型分析RSEI与土地利用强度的耦合关系，如表5和图4所示，对福建省2005—2020年的生态健康发展进行时空演化分析。从2005—2020年，福建省全省耦合协调度上升0.729 0；省内各市耦合协调度均为上升，除厦门市耦合协调度下降0.131 0。2005—2010年期间，福建省全省耦合协调度从0.100 0（严重失调）上升到0.555 0（勉强协调），上升0.455 0；省内泉州市耦合协调度上升明显，从0.093 1（严重失

调）上升到0.911 0（优质协调），上升0.817 9。2010—2015年期间，福建省耦合协调度从0.555 0（勉强协调）到0.850 0（良好协调），上升0.295 0；省内厦门市、泉州市、南平市、龙岩市耦合协调度出现下降，分别下降0.667 0、0.096 0、0.110 0、0.063 0。2015—2020年期间，福建省全省耦合协调度0.850 0（良好协调）下降到0.829 0（良好协调），下降0.021 0；省内莆田市和漳州市耦合协调度下降0.276 0和0.005 0。

表 5 福建省市 2005 年至 2020 年耦合协调度

Tab.5 Coupling coordination table for Fujian province and cities from 2005 to 2020

年	2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	耦合度值	耦合协调等级	耦合度值	耦合协调等级	耦合度值	耦合协调等级	耦合度值	耦合协调等级
福建省	0.100 0	严重失调	0.555 0	勉强协调	0.850 0	良好协调	0.829 0	良好协调
福州市	0.273 0	中度失调	0.315 0	轻度失调	0.680 0	初级协调	0.935 0	优质协调
厦门市	0.446 0	濒临失调	0.906 0	优质协调	0.239 0	中度失调	0.315 0	轻度失调
莆田市	0.293 0	中度失调	0.315 0	轻度失调	0.818 0	良好协调	0.542 0	勉强协调
三明市	0.096 0	严重失调	0.791 0	中级协调	0.869 0	良好协调	0.884 0	良好协调
泉州市	0.093 1	严重失调	0.911 0	优质协调	0.815 0	良好协调	0.831 0	良好协调
漳州市	0.097 1	严重失调	0.763 0	中级协调	0.785 0	中级协调	0.780 0	中级协调
南平市	0.091 9	严重失调	0.875 0	良好协调	0.765 0	中级协调	0.767 0	中级协调
龙岩市	0.095 3	严重失调	0.843 0	良好协调	0.780 0	中级协调	0.845 0	良好协调
宁德市	0.099 3	严重失调	0.792 0	中级协调	0.816 0	良好协调	0.963 0	优质协调

3.4 讨论

从2005—2020年，福建省的耦合协调程度从“严重失调”提升至“良好协调”，表明全省的生态环境与经济、社会发展更加协调向好。在此期间，福州市和宁德市的耦合协调等级已经达到了“优质协调”状态，而厦门市的耦合协调等级仍处于“轻度失调”。随着时间的推移，福建省各市的城镇化建设逐渐发展，城市土地利用不断优化，使得与生态环境质量达到了中等协调或者优质协调。然而，厦门市的城市发展与生态环境保护出现了失衡，导致该市2020年的耦合协调度值为0.315 0，而且耦合协调等级从“濒临失调”变化为“轻度失调”。

厦门市在2005—2020年期间，生态环境质量经历了“改善—退化—退化”的变化趋势。与福建省其他城市相比，生态环境质量滞后，其RSEI值约为0.5，意味着厦门的生态环境需要改善。以2020年的数据为参考，对比2005年，厦门市的土地利用强度增加了0.057 2。厦门市的粮食产量下降了78.95%，位居全省各市之首，而GDP、工业总产值和农业总产值分别上升622.80%,297.69%和130.18%，在全省排名分别为第四、第八和第八。农作物种植面积减少了55.76%，位居全省第一，与此同时就业人数增长了108.25%，也位居全省第一；固定资产投资猛增912.23% ，排名全省第八；建设用地也扩大了78.58%，居全省第五。厦门市的主要变化包括就业人数增多、城镇化进程快速推进、农业产值和投资下降，以及建设用地面积扩大；这些因素导致了土地利用强度指数的上升。同时厦门市的生态环境改善缓慢，并且相对于福建省内其他城市差距较大。其主要原因为就业人口和建设用地不断增加，农业产值和投资下降，从而导致了土地利用强度的持续增长。所以，厦门市生态环境质量相对较差且土地利用强度不断上升，它的耦合程度比较低，处于“轻度失调”。

土地利用强度与生态环境的耦合协调程度可以反映生态健康状况与社会发展的关系。生态健康状况受土地利用变化影响，土地利用受经济因素影响。当前，在生态文明建设政策指引下，生态环境保护已成为我国高质量发展的主要任务之一。但生态文明建设并非以停止社会发展为前提，而是协调好社会发展与生态环境的关系，从而增加社会发展与生态健康状况的耦合协调程度，最终达到促进我国可持续发展的目的。

4 结论

本文结合福建省域遥感生态指数和土地利用强度数据，分析二者的耦合协调程度，获得栅格空间为500 m×500 m的2005—2020年福建省土地利用与生态环境质量耦合协调指标体系，在生态环境质量和土地利用强度2个系统的耦合作用下，分析福建省生态系统健康程度的时空变化特征。主要结论包括：

1）福建省全省生态环境质量呈平稳向好的态势，全省范围呈良好等级，RSEI均值为0.704 8（截至2020年底，下同），全省设区市除厦门市处于一般状态外，其他各市均处于良好等级；2020年全年RSEI平均值相较于2005年，福建省全省增长6.40%；宁德市增长16.71%，最为显著；厦门市降低1.24%，降低最为明显；其他城市分别在9.14%至2.27%的范围内增长。

2）福建省全省土地利用强度增加26.00%，增加值为0.111 4；其中，三明市增长最为显著，增长160.91%；莆田市降低最为明显，降低3.52%；其他城市分别在10.88%至101.82%范围内增长。

3）福建省全省生态环境质量与土地利用强度耦合协调度总体呈良好协调状态，耦合度值为0.829 0，全省设区市中，福州市、宁德市处于优质协调状态，厦门市处于轻度失调状态；2020年耦合度值相较于2005年，福建全省增长0.729 0，设区市中，宁德市增长最为显著，增长值为0.863 7；厦门市降低最为明显，减少值为0.131 0。

本文利用遥感方法和多源数据综合分析生态环境与经济社会发展的协调程度，为生态文明相关分析工作提供技术参考，同时研究成果有助于为福建省市生态文明建设提供辅助决策支撑。但是，也存在一些不足仍需改善：①RSEI指数去除水元素信息，利用其分析评价生态环境忽略了水体对周围环境产生的生态效果，而且RSEI指数利用主成分分析方法进行计算，仅使用第一主成分会导致信息的丢失影响分析结果，后续研究将对生态环境指数进行优化进而全面分析生态健康状况；②生态文明建设需要实现对自然资源的有效管理，从而促进社会发展与生态环境的协调发展，后续研究将基于本文研究成果，利用生态补偿机制构建适用于福建省的生态补偿法体系，为福建省生态文明建设提供更清晰准确的辅助决策。

参考文献（References）：

[1] 左璐，孙雷刚. 基于 MODIS 的京津冀地区生态质量综合评价及其时空变化监测[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(2):203-214. doi: 10.6046/zrzyyg.2021224.

Zuo L, Sun L G. MODIS － based comprehensive assessment and spatial － temporal change monitoring of ecological quality in Beijing － Tianjin － Hebei region[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(2):203-214. doi: 10.6046/zrzyyg.2021224.

[2] 陈梦芸，林广思. 基于自然的解决方案:一个容易被误解的新术语[J]. 南方建筑, 2019(3):40-44.

Chen M Y, Lin G S. Nature-based solutions: a new term that is easily misunderstood[J], 2019（3）: 40-44.

[3] Morgan J A, LeCain D R, Pendall E, et al. C4 grasses prosper as carbon dioxide eliminates desiccation in warmed semi-arid grassland[J]. Nature, 2011, 476(7359): 202-205.

[4] Dong S, Shang Z, Gao J, et al. Enhancing sustainability of grassland ecosystems through ecological restoration and grazing management in an era of climate change on Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2020, 287: 106684.

[5] 刘咏梅，范鸿建，盖星华，等. 基于无人机高光谱影像的 NDVI 估算植被盖度精度分析[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(3): 11-17. doi: 10.6046/zrzyyg.2020406.

Liu Y M, Fan H J, Ge X H, et al. Estimation accuracy of fractional vegetation cover based on normalized difference vegetation index and UAV hyperspectral images[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33(3): 11-17. doi: 10.6046/zrzyyg.2020406.

[6] 张彦敏，张征云，江文渊，等. 天津市重要生态空间的生态变化遥感监测分析[J]. 环境生态学, 2020, 2(6):7-12.

Zhang Y M, Zhang Z Y, Jiang W Y, et al. Remote sensing monitoring and analysis of ecological changes in important ecological spaces in Tianjin[J]. Environmental Ecology, 2020, 2(6):7-12.
[7] Wang G X, Li Y S, Wang Y B, et al. Effects of permafrost thawing on vegetation and soil carbon pool losses on the Qinghai–Tibet Plateau, China[J]. Geoderma, 2008, 143(1): 143-152.
[8] 王雅婷，朱长明，张涛，等. 2002—2020 年秦岭—黄淮平原交界带植被物候特征遥感监测分析[J]. 自然资源遥感，2022, 34(4): 225-234. doi: 10.6046/zrzyyg.2021400.
Wang Y T, Zhu C M, Zhang T, et al. Remote sensing monitoring and analysis of the vegetation phenological characteristics of the Qinling Mountains-Huanghuai Plain ecotone from 2002 to 2020[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4): 225-234. doi: 10.6046/zrzyyg.2021400.
[9] 胡小飞，唐宪，胡月明，等. 广州市城市森林净初级生产力遥感估算[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(5):19-25.
Hu X F, Tang X, Hu Y M, et al. Estimation of net primary productivity of urban forest ecological system in Guangzhou city[J]. Journal of Central South University of Forestry and Technology, 2016, 36(5):19-25.
[10] Bosch A, Dörfer C, He J S, et al. Predicting soil respiration for the Qinghai-Tibet Plateau: An empirical comparison of regression models[J]. Pedobiologia, 2016, 59(1): 41-49.
[11] Veldhuis M P, Ritchie M E, Ogutu J O, et al. Cross-boundary human impacts compromise the Serengeti-Mara ecosystem[J]. Science (American Association for the Advancement of Science), 2019, 363(6434): 1424-1428.
[12] R Klink, F Plas, C. G. E. Noordwijk, et al. Effects of large herbivores on grassland arthropod diversity. Biological Reviews[J], 2015, 90(2): 347-366.
[13] 程军，李云祯，邹渝. 新疆干旱时空动态及其对气候变化的响应[J]. 自然资源遥感，2022，34(4): 216-224. doi: 10.6046/zrzyyg.2021389.
Cheng J, Li Y Z, Zou Y. Spatial and temporal dynamics of drought in Xinjiang and its response to climate change[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4): 216-224. doi: 10.6046/zrzyyg.2021389.
[14] 冯丹阳，张强，周美华. 生态文明视野下可持续发展的未来路径[J]. 生态经济, 2022, 38(5):215-221.
Feng D Y , Zhang Q, Zhou M H. The future path of sustainable development from the perspective of ecological civilization[J]. Ecological Economy, 2022, 38(5):215-221.
[15] 宋爽，田大方，毛靓. 国家湿地公园社会功能评价指标体系构建及应用——以白渔泡国家湿地公园为例[J]. 湿地科学, 2019, 17(2):237-243.
Song S, Tian D F, Mao L. Construction and application of evaluation index system of social functions of national wetland Park: A case study of Baiyupao national wetland park[J]. Wetland Science, 2019, 17(2):237-243.
[16] 李红星，黄解军，梁友嘉，等. 基于遥感生态指数的武汉市生态环境质量评估[J]. 云南大学学报(自然科学版)，2020, 42(1):81-90.
Li H X, Huang J J, Liang Y J, et al. Evaluating the quality of ecological environment in Wuhan based on remote sensing ecological index[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2020, 42(1):81-90.
[17] 吴双. 煤矿沉陷区生态环境遥感监测与评价[D]. 徐州：中国矿业大学, 2021.
Wu S. Remote sensing monitoring and evaluation of ecological environment in coal mine subsidence area[D].Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
[18] 方贺，张育慧，何月，等. 浙江省植被生态质量时空变化及其驱动因素分析[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(2): 245-254. doi: 10.6046/zrzyyg.2022070.
Fang H, Zhang Y H, He Y, et al. Spatio-temporal variations of vegetation ecological quality in Zhejiang Province and their driving factors[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(2): 245-254. doi: 10.6046/zrzyyg.2022070.
[19] 王丽春，焦黎，来风兵，等. 基于遥感生态指数的新疆玛纳斯湖湿地生态变化评价[J]. 生态学报, 2019, 39(8):2963-2972.
Wang L C, Jiao L, Lai F B, et al. Evaluation of ecological changes based on a remote sensing ecological index in a Manas Lake wetland，Xinjiang[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8):2963-2972.
[20] 鲁钰，赵银娣，董霁红. 西北地区三维生态足迹生态安全评价及驱动力分析[J]. 生态学报, 2022, 42(4):1354-1367.
Lu Y, Zhao Y D, Dong J H. Ecological security evaluation and driving force analysis of three-dimensional ecological footprint

in Northwestern China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4):1354-1367.

[21] 熊曦. 基于 DPSIR 模型的国家级生态文明先行示范区生态文明建设分析评价——以湘江源头为例[J]. 生态学报，2020, 40(14):5081-5091.

Xiong X. Analysis and evaluation of ecological civilization construction in national-level ecological civilization demonstration zones based on DPSIR model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14):5081-5091.

[22] Gao X, Shen J, He W, et al. Spatial-temporal analysis of ecosystem services value and research on ecological compensation in Taihu Lake basin of Jiangsu Province in China from 2005 to 2018[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 317: 128241.

[23] 牛晓楠，倪欢，陈国光，等. 福建省生态保护重要性评价[J]. 生态学报, 2022, 42(3):1130-1141.

Niu X N, Ni H, Chen G G, et al. Evaluation of ecological conservation importance of Fujian Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3):1130-1141.

[24] 刘业轩，石晓丽，史文娇. 福建省森林生态系统水源涵养服务评估:InVEST 模型与 meta 分析对比[J]. 生态学报，2021, 41(4):1349-1361.

Liu Y X, Shi X L, Shi W J. Evaluation of water retention services of forest ecosystems in Fujian Province:Comparison between results from the InVEST model and meta-analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4):1349-1361.

[25] 柴哲彬，孙阳，付长超，等. 习近平的绿色发展理念:完善“顶层设计”加固“四梁八柱”[J]. 中国环境监察, 2017(6):9-13.

Chai Z B, Sun Y, Fu C C, et al. Xi Jinping's green development concept: improving the "top-level design" and strengthening the "four pillars"[J]. China Environment Supervision, 2017(6):9-13.

[26] 福建省人民政府发展研究中心课题组，卓祖航，李立敏，等. 福建省生态文明建设的历程与启示[J]. 发展研究，2018(10):46-54.

Fujian provincial people's government development research center subject group, Zhuo Z H, Li L M, et al. The history and inspiration of ecological civilization in Fujian Province[J]. Development Research, 2018(10):46-54.

[27] 王小娜，田金炎，李小娟，等. Google Earth Engine 云平台对遥感发展的改变[J]. 遥感学报, 2022, 26(2):299-309.

Wang X N, Tian J Y, Li X J, et al. Benefits of Google Earth Engine in remote sensing[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(2):299-309.

[28] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.

[29] 陈晓辉，曾晓莹，赵超超,等. 基于遥感生态指数的道路网络生态效应分析——以福州市为例[J]. 生态学报，2021, 41(12):4732-4745.

Chen X H, Zeng X Y, Zhao C C, et al. The ecological effect of road network based on remote sensing ecological index: A case study of Fuzhou City，Fujian Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(12):4732-4745.

[30] 孔玲玲，冯险峰，武爽，等. 拉萨城市圈 1994—2017 年生态质量的时空动态监测及驱动力分析[J]. 地理科学进展，2022, 41(3):437-450.

Kong L L, Feng X F, Wu S, et al. Spatiotemporal dynamics and driving factor analysis of ecological quality change in the Lhasa urban circle from 1994 to 2017[J]. Progress in Geography, 2022, 41(3):437-450.

[31] 徐涵秋. 水体遥感指数研究进展[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2021, 49(05):613-625.

Xu H Q. Development of remote sensing water indices: A review[J]. Journal of Fuzhou University(Natural Science Edition), 2021, 49(05):613-625.

[32] 李霞，朱万泽，舒树淼，等. 基于主成分分析的大渡河中游干暖河谷草地土壤质量评价[J]. 生态学报，2021, 41(10):3891-3900.

Li X, Zhu W X, Shu S M, et al. Soil quality assessment of grassland in dry and warm valley of Dadu River based on principal component analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10):3891-3900.

[33] Oehl F, Sieverding E, Ineichen K, et al. Impact of land use intensity on the species diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in agroecosystems of central Europe[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, 69(5): 2816-2824.

[34] Abecker A, Bernardi A, Maus H, et al. Information supply for business processes: coupling workflow with document analysis and information retrieval[J]. Knowledge-Based Systems, 2000, 13(5): 271-284.

Analysis of the coupled assessment of ecosystem health and its spatial and temporal evolution in Fujian Province

CAO Delong[1]，TANG Tingyuan[2]，LIN Zhen[1*]，XU Zheng[2]， YAN Xu[2]

(1 *Academy of Ecological Civilization, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*； 2 *Beijing Institute of Surveying and Mapping, Beijing* 100038, *China)*

Abstract: In order to explore the causes of excellent ecology in Fujian Province in the past 15 years. This paper selects MODIS images and land use data from 2005 to 2020 as data sources, constructs a land use intensity system, adopts RSEI ecological index as the analysis method, and analyzes the coupling relationship between RSEI and land use intensity by using coupling coordination model. And finally analyzes the spatial and temporal evolution of ecological health in Fujian Province from 2005 to 2020. The results showed that: (1) from 2005 to 2020, the ecological environment development of Fujian Province showed a trend of "improvement-degradation-degradation", the average RSEI value in 2020 was 0.7048, and the ecological environment grade was good; (2) the land use intensity of Fujian Province showed an increasing trend and a growth rate of 26.00%, of which Sanming City in Fujian Province had the largest increase in land use intensity and increased by 160.91%; (3) The coupling coordination degree of Fujian Province increased by 0.75, reaching good coordination; the coupling coordination degree of all cities in the province increased, except for Xiamen City, the coupling coordination degree decreased by 0.131, and the coupling coordination degree was slightly out of balance. This study fills the gap of the research mechanism of the interaction between ecosystem health and land use intensity, and also provides a new perspective for the construction of ecological civilization and the assessment of ecosystem health in Fujian Province and even the whole country.

Key words: Fujian; intensity of land use; extent of ecosystem health; quality of the ecosystem